



プリント基板加工用 $f\theta$ レンズの開発

荒木 高志

Development of F-Theta Lens for Printed Wiring Board Processing — by Takashi Araki — For more compact and advanced electronic devices (such as cellular phones and notebook computers), size and weight reduction of printed wiring boards (PWBs) is increasingly required. These PWBs are processed by a laser drilling machine which can create small holes at high speed. In this process, a laser beam must be focused on a target position on the PWB. Here the f-theta lens plays a pivotal role. The f-theta lens used for PWB processing need to be capable of focusing the laser beam upon fine target spots scattered over a wide scan field. Furthermore, the beam needs to enter vertically into the focal plane. These strict requirements, which a single lens fails to meet, are accomplished by a compound lens that has an optical design which suppresses the aberration to the diffraction-limited level and also has a precise aspheric surface. The author outlines the engineering of the f-theta lens and its application.

Keywords: f-theta lens, laser drilling, PWB, CO₂ gas laser, ZnSe

1. 緒 言

携帯電話・ノートパソコン等のデジタル機器の小型・軽量・高機能化が進んでいる。この背景にはそれに搭載されているプリント基板の小型・高密度化があり、日本の競争優位の源泉のひとつであるプリント基板の実装技術の進歩が大きく貢献している。

そのキーテクノロジーとして、1990年頃より普及したビルドアップ基板がある^{(1)~(3)}。これは積層、穴あけ加工、配線形成などを繰り返すことによって作製された多層構造のプリント基板で、IVH (Interstitial Via Hole) と呼ばれる非貫通の穴に特徴がある (図1)。IVHには、下の導体層に損傷を与えずに寸止めた加工が必要で、しかも高密度実装を行う必要性から微細さが求められる。炭酸ガス

レーザを搭載したレーザドリルマシンでは $\phi 50 \sim 400\mu\text{m}$ の穴加工が2KHz以上という高速で可能な上、導体層の銅により炭酸ガスレーザ光が反射されて原理的に寸止め加工となる。そのため、炭酸ガスレーザドリルマシンによる穴あけ加工はIVH加工プロセスのデファクトスタンダードとなっている^{(4),(5)}。

図2にレーザドリルマシンの概要を示す。発振器からのレーザビームを2軸のガルバノスキャナで制御されたスキャンミラーで高速に振りプリント基板上の目標の位置へ $f\theta$ レンズで集光することにより加工を行うものである。実

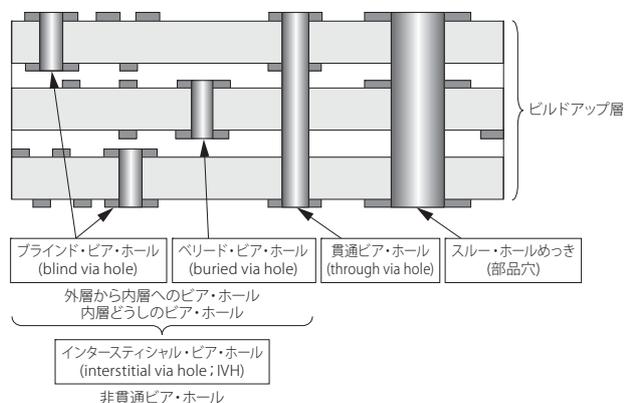


図1 ビルドアップ基板とビア・ホール

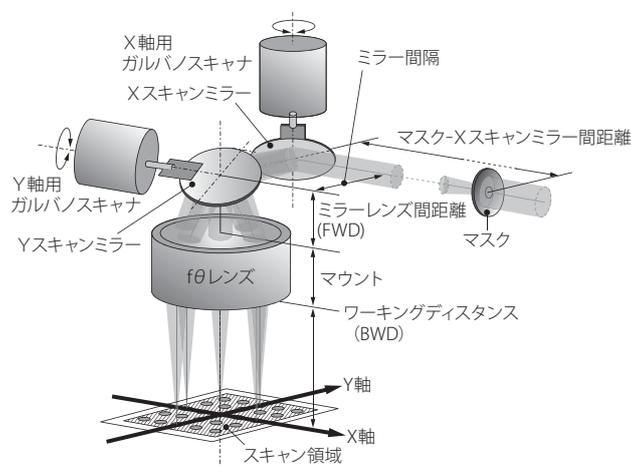


図2 $f\theta$ レンズを用いた穴あけ加工の概要

際のレーザドリルマシンでは、プリント基板はXYステージに載せられておりガルバノスキャナの動きとあいまって、広い面積を高速加工できるようにシステム化されている。

このレーザドリルマシンを使用した加工プロセスは、携帯電話・デジタルカメラ等の電子回路基板への適用から始まった。現在では、半導体チップを搭載する、より小径で真円度の高い穴が必要なパッケージ基板の加工にも使用されている。コストダウンのため、従来メカドリルで行われていた貫通穴加工をレーザドリルで行おうとする動きもある。基板材料という観点では、樹脂にガラス繊維が混ざった難加工材への加工も可能で、注目が集まっている。さらには、積層セラミックチップコンデンサなどの電子部品製造のため、グリーンシートへの加工にも実用化されている。

これら拡大する用途に対応するため、当社では小径加工用 $f\theta$ レンズ、大面積加工用 $f\theta$ レンズのほか個別用途に適合した $f\theta$ レンズを種々開発してきた。本論文では、プリント基板加工用 $f\theta$ レンズについての概要を述べた後、炭酸ガスレーザ用 $f\theta$ レンズを中心に、当社における設計・製造について概観し、最後に他の部品と組み合わせて高機能化を追求した事例等を紹介する。

2. プリント基板加工用 $f\theta$ レンズの特徴

ここでは3種のレーザ加工用レンズを比較することで、プリント基板加工用 $f\theta$ レンズの特徴を明らかにする。

図3(a)は、鋼板の切断・溶接に用いられる一般的なレンズによるレーザ集光の様子を示したものである。レンズに垂直に入射したレーザ光をレンズから一定距離離れた加工面上に微小なスポットで集光することができる。集光位

置を変化させるべくレーザビームを角度 θ (rad)だけ傾けて入射させると、レンズ通過後のレーザビームは中心から $f \times \tan\theta$ 離れた位置に向かう(ここで、 f はレンズの焦点距離)が、図のように焦点が垂直入射時に比較してレンズ側へシフトしてしまうこともあって、集光スポット径は非常に大きくなってしまふ。ここで図3下方に示した等高線は、各スポットの強度分布を示すPSF (point spread function) コンター図であり、中央のピーク強度を100%として9%刻みで等強度曲線を描いたものであり、集光スポットのサイズや形状の違いを示している。

図3(b)は、マーカに良く用いられるレンズ1枚構成の $f\theta$ レンズの特性を示したものである。レーザビームを傾けた場合の集光位置は中心から $f \times \theta$ となり、入射角度 θ に対し線形となるのが特徴で、 $f\theta$ レンズの名前の由来である。しかしながら、焦点面に対しビームは垂直入射せず(テレセントリックエラー)、収差(光学的歪み)も残っているため、楕円の集光スポットとなる。

図3(c)は、プリント基板加工用 $f\theta$ レンズによる集光の様子を示したものである。この $f\theta$ レンズではレーザビームを傾けて入射させた場合においても集光面に対しビームがほぼ垂直に入射し、同一面上で同程度の微小なスポット径に集光することができる。しかしながら、このような高い性能を実現するため、プリント基板加工用 $f\theta$ レンズは複数の大口径レンズによって構成される組レンズとなり、さらにレーザビームを極限まで微小に集光するために各レンズは収差を抑えることを目的に非球面形状を有することが多い。

3. 設 計

3-1 $f\theta$ レンズの光学設計 設計においては、最初にプリント基板加工における穴径やその均一性、スキャン領域等の要求を、光学的な仕様に仕立て直し、次にその光学仕様を満足するレンズ構造を、公差を含めて決定していくことになる⁽⁶⁾。

$f\theta$ レンズには、図4左側の要求に示すように、広いスキャン領域と小さなスポット径、小さなテレセントリックエラー等が要求されるので、スキャン領域全域にわたって回折限界レベルの集光特性が必要となる。しかしながら、広いスキャン領域を得ようとする一般にスポット径のバラツキが大きくなる等、多くの特性はトレードオフの関係にある。さらに、高性能を要求されるレンズの設計解は製造誤差に敏感なことが多く、試作ではたまたまうまく使用できる $f\theta$ レンズを製造できても、いざ量産してみると特性ばらつきが大きく、事実上使えないということが起こり得る。

ここで重要となるのは、製造の実力値を十分に把握して、光学設計の条件に織り込むことである。当社では、図4右側の解決手段に示すように、構成レンズの素材や枚数を選択し必要に応じて非球面も導入しながら、公差に余裕のあ

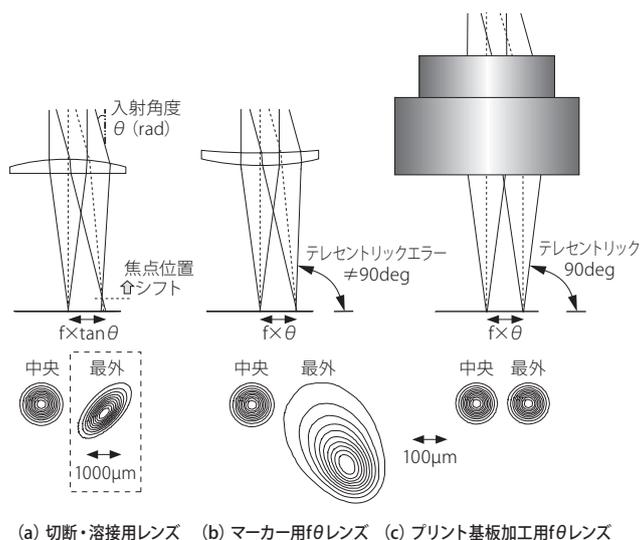


図3 レーザ加工用レンズの特性の比較図
(波長9.4μm、焦点距離100mm、φ13mmのガウシアンビームを入射)
上段：光路図、下段：各入射角でのPSFコンター図

要 求		解決手段	
高性能	<ul style="list-style-type: none"> ・小さいスポット径 ・真円のスポット ・均一な大きさのスポット ・小さな像面湾曲 	光学設計	<ul style="list-style-type: none"> ・回折限界レベルの収差補正 ・公差に余裕のある光学設計解を得る最適化計算
高機能	<ul style="list-style-type: none"> ・大きなスキャン領域 ・小さなテレセントリックエラー ・良好なスキャン線形性 	製造	<ul style="list-style-type: none"> ・構成レンズ素材 ・構成レンズ枚数 ・非球面使用 ... ・高精度レンズ加工 ・高精度マウント加工 ・高精度組立 ・評価
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ワーキングディスタンス制約 ・fθレンズ大きさ制約 (マシンに装着できること) 		

→製造誤差に敏感な設計解になりやすい

↳製造誤差にロバストな高精度fθレンズの実現

図4 要求と解決手段

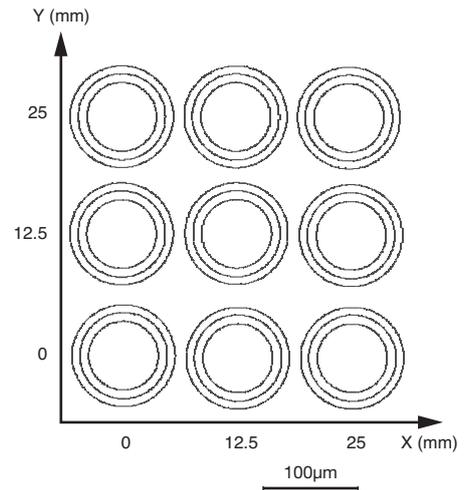


図6 結像解析

る設計解を得る光学設計⁽⁷⁾を行っている。後述する高精度なレンズ加工と組立を組み合わせることで、高精度且つ製造誤差にロバストなfθレンズを実現している。

炭酸ガスレーザの波長は9.3～10.6µmの赤外領域にあるので、使用できる素材は一般にはZnSeとGeに限られている。図5の光路図は、これらの素材を使用した非球面を含むfθレンズの光学設計結果の代表例である。機構設計も含めた設計結果および特性解析結果を表1、表2に示す。図6は、このfθレンズでφ2mmマスク像を縮小転写した場合の結像解析結果をスキャン領域内の主要点において示したものである（このコンター図では30%、13.5%、5%の強度のみを示してある。スポット径は、それぞれ76µm、93µm、110µmと算出される）。スキャン領域の全域で真円度の高い加工特性が期待される。

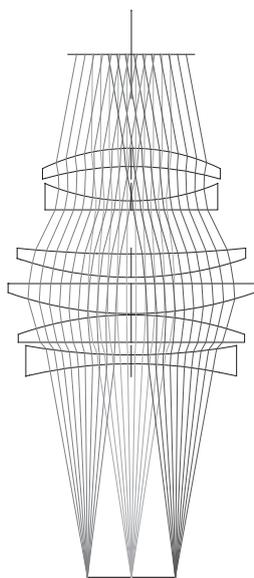


図5 光路図

表1 fθレンズの代表的な設計結果

No.	項目	仕様	備考
1	波長	9.4µm	
2	入射ビーム径	φ26mm	入射瞳径
3	マスク-Xミラー間距離	2000mm	
4	スキャンミラー間距離	37mm	
5	ミラーレンズ間距離 (FWD)	32mm	ミラーからレンズマウント端面までの距離
6	焦点距離	100mm	
7	スキャン領域	52mm角	
8	マウント外形	φ140mm L80mm	ウインドウセルを含むサイズ
9	カバーウインドウ	標準装備	ウインドウセルは脱着可

表2 φ2mmマスクを像転写した場合の特性

No.	項目	特性	備考
10	ワーキングディスタンス (BWD)	95.9mm	
11	スポット径	φ93µm	ピーク強度13.5%にて
12	スポット径バラツキ	±0.10%	{max-min}/min × 100 ÷ 2(%) ピーク強度13.5%にて
13	スポット真円度	99%	ピーク強度13.5%にて
14	最大テレセントリックエラー	4.0deg	

3-2 fθレンズの機構設計 前項で得られた光学設計解は、各レンズの曲率半径、厚さ、レンズ間隔、ディセクター（軸ずれ）、ティルト（傾き）等の品質項目の値と公差である。これらの諸量は通常数十に上るが、光軸（仮想基準軸）という機械的に設定しがたい概念の下で制御され

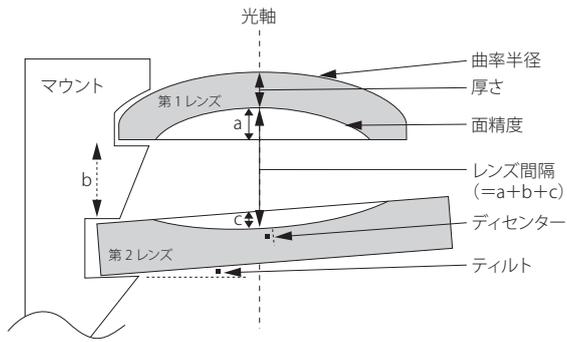


図7 機構設計

なければならない。機構設計では、図7のように、個別のレンズ形状を具体的に決めつつマウント（筐体）を用いて高精度に位置決めする。ディセーター、ティルト、レンズ間隔の組立精度はミクロンオーダーが必要とされ、場合によっては、調整可能なマウント構造を採用することもある。

4. 製造

4-1 製造フロー 当社の光学部品事業は、炭酸ガスレーザー用の切断・溶接加工用レンズの製造・販売がそのルーツであり、

ZnSe素材合成→研磨加工→光学薄膜コート→検査と一貫した製作プロセスを保有していることが特徴である。fθレンズは組レンズのため、このような①個別レンズ製造工程に、②マウント製造工程、③組立工程が加わる。図8に製造フローを示す。

プリント基板加工用fθレンズ開発のためには、大口径の高精度非球面レンズの製作が不可欠である。当社は早くに、ZnSe非球面単レンズの製品化を達成し、シーズ技術の開発も終えていた⁽⁸⁾。当社は、これらの要素技術を発展させつつ、レンズの大口径化と高精度化への対応をタイムリーに実施したことで、レーザードリルマシンの開発初期からこの分野に参入できた。写真1は、図8のフローに従って製作したfθレンズの製品例である。次項からは、fθレンズ製造のポイントとして、高精度加工技術と性能評価について述べる。

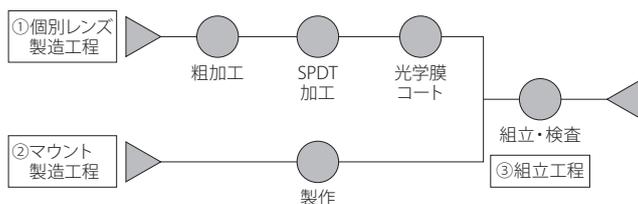


図8 fθレンズ製造フロー



写真1 製造したfθレンズ

4-2 高精度加工技術 ここでは厳しい要求精度を満足させるために特に重要な超精密切削加工技術（Single Point Diamond Turning：SPDT）について述べる^{(9)、(10)}。それに使用される超精密旋盤は、NC制御の位置分解能0.03mmで、エアースピンドル、油静圧スライドなどで構成される。レンズの加工は、図9に示すようにレンズ素材を主軸に取り付けて回転させ、バイト刃先が目的とするレンズ形状（球面・非球面など）の軌跡を描くように2軸同時にNC制御しながら旋削加工することで実施される。fθレンズを構成する高精度レンズを得るためには、機械の運動精度が高いのはもちろん、加工環境（加工時の温度制御、床振動等）の変動抑制、加工する材質に適した加工条件

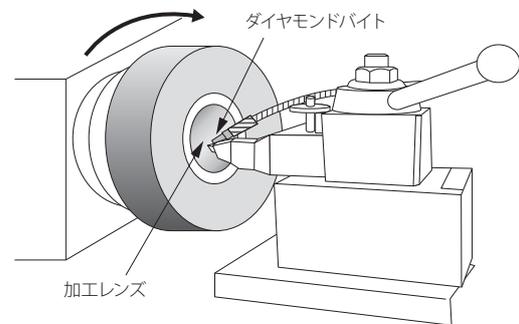


図9 超精密旋盤によるレンズ加工

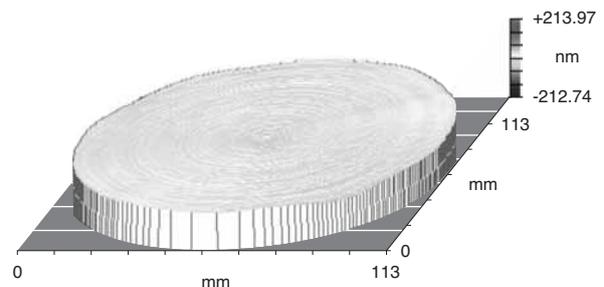


図10 超精密切削加工による加工結果

(切り込み量、送り速度、切削速度、バイト刃先形状)の最適化、エアスピンドルの高剛性化が必要である。

図10にSPDT加工を行ったレンズの非球面形状測定結果の代表例を示す。本加工において設計非球面からのずれを示す形状精度は0.076 μ mと非常に高精度である。

4-3 性能評価 表1の仕様のf θ レンズを製作し、実際に銅箔付きポリイミドフィルムに穴あけ加工を行った。スキャン領域の中央と最外位置での穴の様子を図11に示すが、真円度の高い直径約100 μ mの穴となっていることがわかる。図6のコンター図で示される強度分布から算出されるスポット径と加工穴径との比較から、この材料の加工閾値はかなり低いことが伺える。

このような実装評価の他、f θ レンズの評価には次のような方法を採用することができる。

①製造工程で採取した製造実績データから特性をシミュレートする方法。製造実績データとは、厚さ・曲率半径等の構成レンズの測定値やディセクター・レンズ間隔等の組立作業時の採取値である。

②製作したf θ レンズを純粋な光学的測定により評価する方法。

②の方法は、上述の実装評価とは異なりレーザ装置や加工材料等の特性の影響を受けずに、f θ レンズのみの実物評価が可能である。一般に赤外域での光学測定は難度が高いものとなるが、当社ではこの測定技術開発も積極的に進めている。

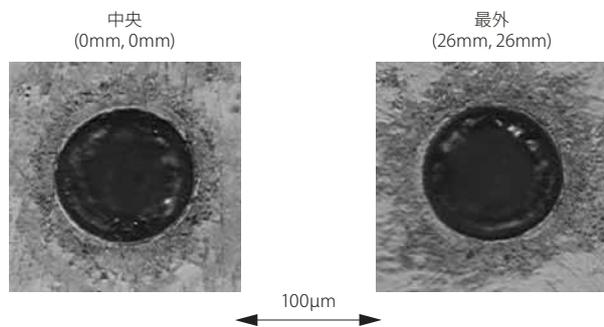


図11 穴あけ加工結果

5. 各種の炭酸ガスレーザ用f θ レンズ

5-1 基本ラインアップ プリント基板では真円度の良好な穴あけ加工が求められるため、f θ レンズにはスキャン領域全域にわたって回折限界レベルの集光特性が求められる。その制約の中で、小さなスポットを得ようとすると、焦点距離を短くするか或いは入射ビーム径を大きくする必要がある。いずれの場合もガルバノミラー系が大きくなり、テレセントリックエラーが増大し、結果としてスキャン領域を狭めることになる。このように多くの特性はトレードオフの関係にあり、基本性能のみを重視したタイ

表3 炭酸ガスレーザ用f θ レンズの基本ラインアップ

	広スキャン領域型	標準型1	標準型2	精細型	VA型1	VA型2
ビーム径 (EPD)	ø30mm	ø30mm	ø30mm	ø30mm	ø20mm	ø20mm
スキャン領域	100mm□	50mm□	40mm□	30mm□	50mm□	40mm□
焦点距離	170mm	100mm	80mm	65mm	100mm	80mm

プであっても、表3のように自ずとf θ レンズの種類は多くなる。加工方法とプリント基板材料に依存するところは大きいですが、種々の品種により、穴径はø50~400 μ mを優にカバーしている。これらから派生して、低加工閾値材料対応型、個別波長対応(10.6/9.6/9.4 μ m)型、He-Neレーザ透過型や大パワー透過型等々種々の目的別品種がある。

5-2 加工飛散物への対応 レーザドリルマシンでプリント基板を穴加工すると、基板成分がスパッタとなって飛散し、一部はf θ レンズに飛来し、汚れのようになって付着する。その結果、f θ レンズの透過率が低下し、加工できなくなる。特にプリント基板の銅ダイレクト加工で問題となることが多い。解決方法は、f θ レンズとプリント基板の距離(ワーキングディスタンス; BWD)を大きくするか、又はf θ レンズに標準装着しているカバーウインドウ射出面を適宜クリーニングすることである。前者のBWDの大きいレンズは光学的にはレトロフォーカス型と呼ばれ、通常スキャン領域の拡大が難しい上、レンズ径が大きく高価となる。表4に一例を示す。後者のウインドウについて

表4 ワーキングディスタンス(BWD)の大きいf θ レンズの例

	標準型1	レトロフォーカス型
入射ビーム径	ø30mm	←
スキャン領域	50mm角	45mm角
焦点距離	100mm	←
ワーキングディスタンス(BWD)	96mm	125mm
マウント外形	ø140mm L80mm	ø170mm L92mm

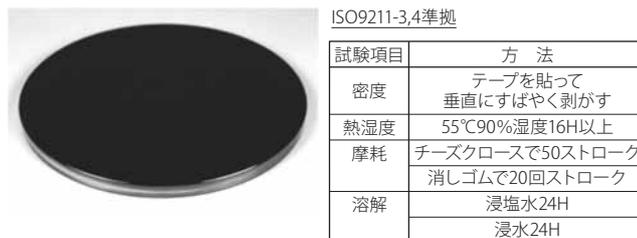


写真2 DLCコーティングウインドウ

は、クリーニング時の摩擦に強いダイヤモンドライクカーボン（Diamond Like Carbon；DLC）コーティングを施したウインドウ（写真2）が開発⁽¹¹⁾されてからは、レトロフォーカス型f θ レンズの使用は限定的となった。

5-3 温度依存性／波長依存性の低減 f θ レンズが使用される環境は、レーザの通過や周囲部品による発熱、レーザ発振波長のふらつき等の影響で、常時変化し得る。マシン側でその原因を取り除くことが最も有効ではあるが、環境変化に対してロバストなf θ レンズを使用するのも有効な対策である。f θ レンズでは屈折率の高いGeが使われていることが多いが、温度依存性を低減する場合には屈折率の温度依存性の大きいGeの使用を控えるのが1つの対策となる（表5）。波長依存性の低減を図る場合には、表5に示すZnSeとGeの素材特性の差をうまく利用することがポイントになる。表6に温度依存性を低減したf θ レンズの設計例を示す。ワーキングディスタンス（BWD）や集光位置の変動が抑えられていることがわかる。

なお、屈折型と回折型を組み合わせたハイブリッド方式により、温度安定性向上と入射レーザ波長依存性の低減を実現したf θ レンズの開発も報告されている⁽¹²⁾。

表5 ZnSeとGeの屈折率特性の比較

	ZnSe物性値	Ge物性値	Ge特性 (ZnSeを基準)
屈折率 n	2.410	4.006	約2倍 <注：空気との屈折率差n-1に対して>
屈折率温度依存性 dn/dT	5.7×10^{-5}	4.2×10^{-4}	約7.3倍
屈折率波長依存性 dn/d λ	-5.4×10^{-3}	-1.1×10^{-3}	約1/5倍

表6 温度依存性を低減したf θ レンズの例

（主な仕様：焦点距離100mm、スキャン領域50mm角）

	標準型1	温度依存性低減型
ワーキングディスタンス（BWD）の変化	23.6 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	6.5 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$
最外集光位置（25mm, 25mm）の変化	-7.7 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$	-1.8 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$

6. 高機能追求と次の展開

f θ レンズと他の光学部品を組み合わせることで、機能を上げることができる。

図12はテーパレス穴あけ光学系の概要である⁽¹³⁾。ガウス強度分布を持つレーザビームを非球面ビームホモジナイザにより強度を均一化し、そのビームのマスク像をf θ レンズにより縮小転写する。既にビルドアップ基板の加工で多用されている。

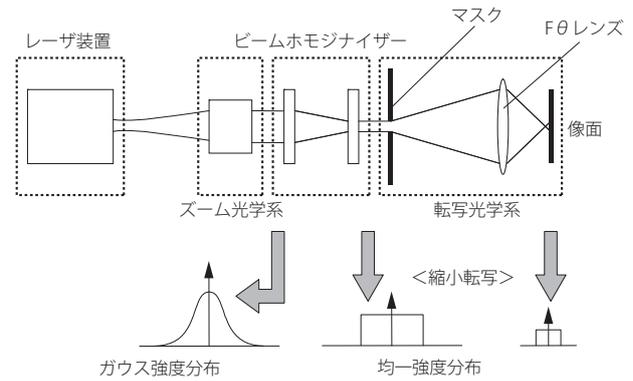


図12 テーパレス穴あけ光学系の概要

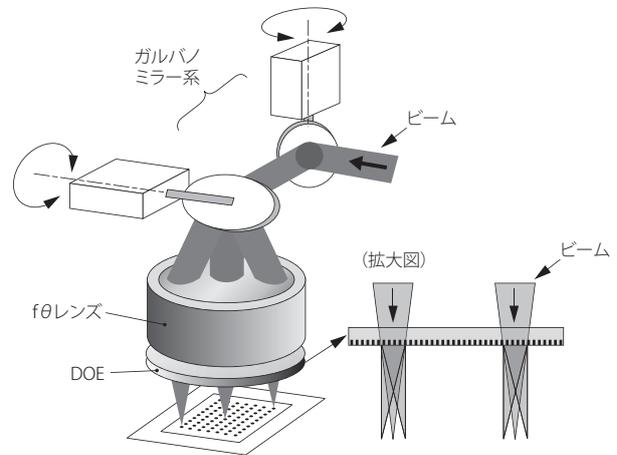


図13 一括多点穴あけ光学系の概要

図13は一括多点穴あけ光学系の概要である。f θ レンズの後段に設置された回折型光学素子（Diffractive Optical Elements；DOE）によりビームを分岐させるので、穴あけ速度が数倍になる。

プリント基板の穴径縮小の動きは加速している。当社は未だ現状の穴径が炭酸ガスレーザドリルの限界とは考えておらず、まだ小径化は技術的に可能と判断して、さらなる高性能f θ レンズ開発も進めている。しかしながら、炭酸ガスレーザ（波長9.3～10.6 μm ）からUVレーザ（波長0.355 μm ）への光源の移行も有力な選択肢である。UVレーザ用f θ レンズの開発は既報⁽¹⁴⁾の如く当社も進めている（写真3）。このUVレーザ用f θ レンズはシリコンの貫通穴加工（Through Silicon Via；TSV）への適用も期待されている⁽¹⁵⁾。



写真3 今後が期待されるUVレーザ用fθレンズ

7. 結 言

プリント基板加工用として、主に炭酸ガスレーザ用fθレンズを中心に、当社における設計・製造と種々のfθレンズについて述べてきた。今回紙面の都合上論じなかったが、fθレンズの性能を光学的に評価し、そのデータと加工結果の相関をとることで、加工性能の高いfθレンズを市場に供給していくことも可能と考えている。

要求仕様と設計・製造の実力から判断される実現可能なレベルとは乖離があることが多く、その時は困難でも改善や開発を進め数年後に新しいfθレンズをひとつの形として提案できることがある。設計と製造の担当者が新しい技術も取り入れながら、かんかながくがくの議論をして、お互い可能なぎりぎりの形で製造設計にまで落とせた際は、また一歩進めたと感慨がある。そして、実際に工程に流しfθレンズを完成させることができた際には、手前みそながら機能的な美を感じることもある。但し、そのような場合には、工業製品として低コスト化し普及させていくことが次の仕事となる。

今後も、このような新しい形の提案を続け、レーザ加工という面からデジタル機器の発展に寄与していく所存である。

用語集

レトロフォーカス

Retrofocus：レトロは「後ろへ」、フォーカスは「焦点」を意味する。焦点距離に比べてバックフォーカス（ここではBWD）が長いこと。

参 考 文 献

- (1) 「第7章 ディフィカルトチェンジ」、2007年度版日本実装技術ロードマップ プリント配線板技術編、社団法人 電子情報技術産業協会、p130-284 (2007)
- (2) 宇都宮久修、「プリント配線板技術ロードマップと最新動向 (1)」、JPCA NEWS 2009 October、p16-25
- (3) 剣持裕治、「高速信号を扱う際、知っておきたい多層基板の基礎」、Design Wave Magazine 2007 June、p79-80
- (4) 中井出ほか、「プリント配線板のレーザ高速穴あけ装置」、第35回レーザ熱加工研究会誌、vol.2、No.2、p.199-206 (1995)
- (5) 北泰彦ほか、「CO2レーザ銅ダイレクト加工の技術動向」、第23回エレクトロニクス実装学会 (2009)
- (6) 荒木高志ほか、「レーザ穴あけ加工用fθレンズの開発」、SEIテクニカルレビュー、第154号、p89-95 (1999)
- (7) 布施敬司、「レンズ及び光学系の設計方法」、特許第3006611号 (1999)
- (8) 江畑恵司ほか、「ZnSe非球面集光レンズの特性」、住友電気、第148号、p106-112 (1996)
- (9) 京谷達也ほか、「CO2レーザ用Moコート放物面鏡」、住友電気、第138号、p162-167 (1991)
- (10) 平井隆之ほか、「高出力ファイバーレーザ用放物面鏡加工ヘッドの開発」、第71回レーザ加工学会講演会 (2008)
- (11) 「赤外カメラ用光学部品を製品化 (広域反射防止膜/BBARの開発)」、SEIテクニカルレビュー、第175号、p145 (2009)
- (12) 布施敬司ほか、「レーザ穴明け用回折型fθレンズの開発」、SEIテクニカルレビュー、第159号、p66-71 (2001)
- (13) 平井隆之ほか、「非球面ビームホモジナイザーの開発」、SEIテクニカルレビュー、第161号、p91-97 (2002)
- (14) 荒木高志ほか、「UVレーザ用fθレンズの開発」、SEIテクニカルレビュー、第175号、p62-67 (2009)
- (15) 成田知徳、「TSV用レーザー・ドリリング及び薄型ウエハーのダイシング」、Proceedings xm-07-043.0 STS Japan (2007)

執 筆 者

荒木 高志 : シニアスペシャリスト
住友電工ハードメタル(株)
光学部品開発部 主幹
レーザ加工用光学部品の開発に従事

